ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/219

**БОЛЬШИЕ ОБРАТИМЫЕ ДЕФОРМАЦИИ В СОСТАРЕННЫХ ПОД НАГРУЗКОЙ В
МАРТЕНСИТЕ МОНОКРИСТАЛЛАХ СПЛАВОВ NiFeGaCo и NiMnGa**

Панченко Е.Ю., Тимофеева Е.Е., Ларченкова Н.Г., Пичкалева М.В., Ефтифеева А.С.,
Тохметова А.Б., Тагильцев А.И., Суриков Н.Ю., Чумляков Ю.И.

Томский государственный университет, Томск

Впервые на монокристаллах сплавов NiFeGaCo и NiMnGa, ориентированных вдоль $[001]_A$ -направления, получены большие обратимые деформации (ферроэластичность (ФЭ)) до 13-15% за счет переориентации вариантов $L1_0$ -мартенсита в циклах нагрузка/разгрузка в широком интервале температур. Экспериментально показано, что во всех исследованных монокристаллах сплавов $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$, $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ и $Ni_{53}Mn_{22}Ga_{25}$ (at.%) эффективным способом для создания условий развития ФЭ под действием внешних сжимающих напряжений, приложенных вдоль $[001]_A$ -направления, является термомеханическая низкотемпературная обработка – старение в мартенсите под нагрузкой (СМН). Данная термомеханическая обработка заключается в проведении старения (выдержек) под нагрузкой при $T=423-498$ К в мартенситном состоянии, индуцированном сжимающими напряжениями вдоль $[110]_A||[100]_M$, что приводит к стабилизации преимущественного раздвоенного варианта мартенсита. Физические причины стабилизации мартенсита напряжений при СМН обусловлены снижением его свободной энергии за счет переориентации ближнего порядка в расположении точечных дефектов и атомов разного сорта в подрешетках в соответствии с симметрией тетрагонального $L1_0$ -мартенсита [1-3]. Ранее явление стабилизации мартенсита рассматривалось как вредный, неконтролируемый эффект, приводящий к деградации функциональных свойств за исключением последних работ, выполненных на монокристаллах сплава CoNiGa [2, 3]. Однако в данных работах такие функциональные свойства, как ФЭ не исследовали.

В исходных без специальной термомеханической обработки $[001]_A$ -кристаллах сплавов NiFeGaCo и NiMnGa в циклах нагрузка/разгрузка при действии сжимающих напряжений в мартенситном состоянии ($T < A_s$) заданная деформация, которая развивается за счет переориентации самоаккомодирующей структуры $L1_0$ -мартенсита, является обратимой только после снятия нагрузки и нагрева до $T > A_f$ за счет обратного $L1_0$ - $B2(L2_1)$ мартенситного превращения (МП), т.е. проявляется эффект памяти формы. При этом максимальная величина обратимой сжимающей деформации вдоль $[001]_A$ -направления не превышает теоретическую величину деформации $B2(L2_1)$ - $L1_0$ превращения 5-6 % (рис. 1 а).

СМН приводит к развитию деформации при $T < A_s$ в мартенситном состоянии за счет переориентации стабилизированного варианта $L1_0$ -мартенсита OM1, который увеличивает размеры образца вдоль $[001]_A$ -направления, в другой вариант мартенсита OM2, возникающего под действием сжимающей нагрузки. Полученная обратимая деформация при проявлении ФЭ достигает 13,0-15,0 %, что почти в 3 раза превышает экспериментальные значения величины обратимой деформации при проявлении эффекта памяти формы в этих образцах до СМН. ФЭ в $[001]_{B2}$ -монокристаллах $Ni_{51}Fe_{18}Ga_{27}Co_4$ характеризуется высокой устойчивостью к циклическим испытаниям, низкими критическими напряжениями $\sigma_{кр}=13-16$ МПа и достаточно узким механическим гистерезисом $\Delta\sigma=35$ МПа, не зависящим от степени деформации во всем температурном интервале ее проявления как при температурах вблизи комнатной, так и при пониженных температурах испытания вплоть до -70 °С (рис. 1 б).

Изменение химического состава сплава и наличие небольшой объемной доли включений γ -фазы в $[001]_{B2}$ -кристаллах $Ni_{49}Fe_{18}Ga_{27}Co_6$ после СМН приводит к развитию деформации в мартенсите при действии внешних сжимающих напряжений со значительным упрочнением, величина механического гистерезиса при проявлении ФЭ зависит от степени деформации и достигает $\Delta\sigma=50$ МПа при заданной деформации 13,0 %.

В $[001]_{B2}$ -монокристаллах $Ni_{53}Mn_{25}Ga_{22}$ после СМН получена ФЭ с обратимой деформацией 13,2 %. Однако заданная деформация является обратимой в кристаллах

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

$\text{Ni}_{53}\text{Mn}_{25}\text{Ga}_{22}$ только в узком температурном интервале вблизи $T=398$ К. При температурах $T<398$ К переориентация вариантов мартенсита наблюдается при более низких критических напряжениях $\sigma_{\text{кр}} \approx 10\text{--}12$ МПа и заданная деформация 13,0 % является необратимой при снятии нагрузки. Поскольку переориентация мартенситных вариантов протекает при деформирующих напряжениях $\sigma=10\text{--}12$ МПа, которые меньше величины механического гистерезиса $\Delta\sigma=20$ МПа. Образец восстанавливает свои размеры только после нагрева до более высокой температуры $T \geq 398$ К.

Таким образом, для наблюдения ФЭ необходимо, чтобы деформирующие напряжения для переориентации вариантов мартенсита были выше, чем величина механического гистерезиса $\Delta\sigma$. Данное условие аналогично условию наблюдению сверхэластичности при развитии МП под нагрузкой [4].

Рис. 1. Кривые $\sigma(\epsilon)$ при сжатии вдоль $[001]_{\text{B2}}$ -направления для монокристаллов $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$, демонстрирующие эффект памяти формы до СМН (а) и ферроэластичность после СМН (б).

Используя кристаллографическую теорию МП проведен расчет максимальной теоретической деформации [5], связанной с переориентацией варианта мартенсита OM1 в OM2 при условии сжатия вдоль $[001]_{\text{A}}$ -направления, для исследуемых монокристаллов. Вдоль направления $[001]_{\text{A}} || [001]_{\text{M}}^{\text{OM1}}$ теоретическое значение деформации за счет переориентации вариантов мартенсита составляет 16,6 % для кристаллов NiFeGaCo и 15,5 % для кристаллов NiMnGa . Экспериментально полученные значения обратимой деформации 13-15% при проявлении ферроэластичности близки к теоретическим значениям.

Монокристаллы ферромагнитных сплавов после СМН, проявляющие ФЭ в широком температурном интервале ниже 398 К с большой величиной обратимой сжимающей деформации до 15 %, могут найти широкое практическое применение в качестве рабочего тела демпфирующих устройств, термо- и магнитоконтролируемых датчиков и силовых приводов, способных работать как при температурах вблизи комнатной, так и при пониженных температурах испытания вплоть до -70°C .

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 16-19-10250.

1. Otsuka, X. Ren. Mechanism of martensite aging effects and new aspects // Materials Science and Engineering A. 2001. V.312. C. 207-218.
2. Kadletz P., Krooß P., Chumlyakov Yu., et al. Martensite stabilization in shape memory alloys – Experimental evidence for short-range ordering // Materials Letters. 2015. V. 159. C.16-19.
3. Niendorf T., Krooß P., Somsen C., et al. Martensite aging – avenue to new high temperature shape memory alloys // Acta Mater. 2015. V. 89 C. 298-304.
4. Liu Y., Galvin S. Criteria for pseudoelasticity in near-equiatomic NiTi shape memory alloys // Acta Mater. 1997. V.45 C. 4431–4439.
5. Panchenko E., Timofeeva E., Eftifeeva A, et al. Giant rubber-like behavior induced by martensite aging in $\text{Ni}_{51}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}\text{Co}_4$ single crystals // Scripta Mater. 2019.V. 162.C. 387-390.